

단일단 전압벨런싱 회로의 집적을 통한 양극성 DC 배전 시스템용 고밀도 절연형 전력변환장치

직류 배전 시스템은 AC/DC 인버터가 필요 없고, AC 저항에 의한 송전선로의 손실이 없어 교류 배전 시스템을 대체하는 미래형 전력 배전 시스템으로 주목받고 있다. 특히 양극성 직류 배전 방식은 단극성 방식에 비해 다양한 전압 레벨을 가지게 되는 장점이 있다. 양극성 DC 버스를 구현하기 위해선 DAB 컨버터와 전압 벨런서가 2단 구조로 필요하고, 이는 전력밀도와 전력변환효율의 측면에서 불리한 문제점이 있다. 본 원고에서는 고전력밀도 및 높은 전력변환효율을 위해 컨버터와 벨런서의 두 가지 전력변환장치의 기능을 하나로 합친 단일단 전압벨런싱 회로에 대해 소개하고자 한다.

1. 서론

최근 신재생 에너지, 전기 자동차 및 DC 유닛이 증가함에 따라 기존 교류 배전보다는 AC/DC 인버터가 필요없는 직류 배전이 미래형 배전 시스템으로 각광 받고 있다. 직류 배전 시스템은 무효 전력 및 계통 주파수가 없어 전력 시스템의 제어가 간단한 장점이 있다. DC 유닛은 AC/DC 인버터 없이 DC 버스로 바로 접속 가능하여 전력변환효율을 상승시킬 수 있다.

직류 배전에는 크게 양극성과 단극성 방식으로 구성된 두 가지 버스 구조가 있다. 단극성 방식은 하나의 DC 폴로 구성되어 단일 전압 레벨만 공급이 가능하다. 하지만 양극성 방식은 두 개의 DC 폴로 구성되어 두 개의 전압 레벨이 공급 가능하고, 하나의 DC 폴에 단락이 생겨도 나머지 DC 폴로 전력을 공급할 수 있어 시스템 안정도가 높다는 장점이 있다. 또한, 접지에 대한 전압 레벨이 절반으로 줄어 감전에 대한 사용자의 위험성이 크게 감소한다¹⁾.

그림 1과 같이 양극성 DC 버스의 전압을 구현하기 위해서는 Dual-Active-Bridge(DAB) 컨버터와 전압 벨런서가 2단으로 구성되는 것이 일반적이다. 하지만 2단 구조는 전력변환장치의

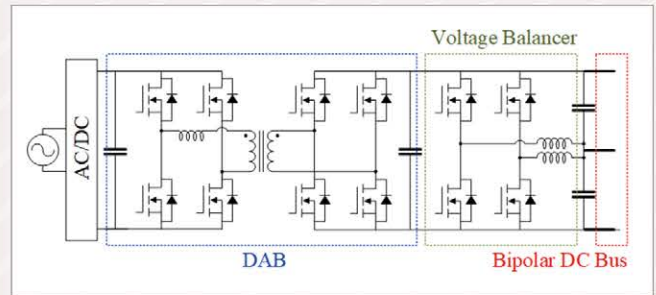


그림 1 양극성 DC 배전 시스템 구성도

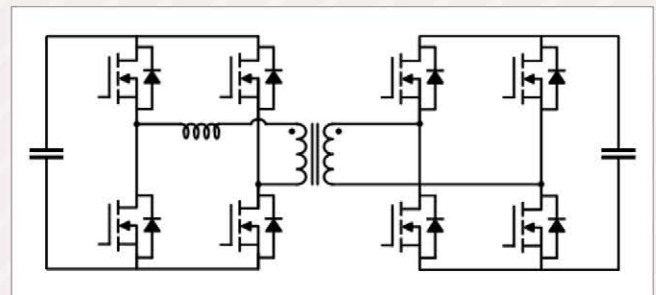


그림 2 DAB 컨버터

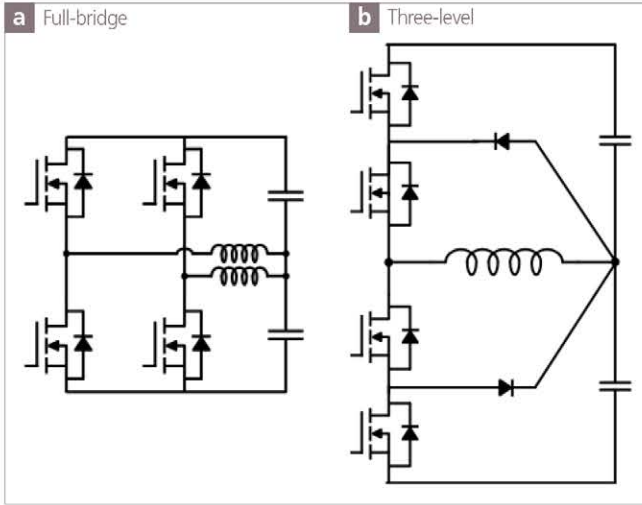


그림 3 전압 벨런서

전력밀도 및 전력변환효율이 감소하고 제작 및 구축 비용이 증가하는 문제점이 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 두 컨버터의 기능을 모두 가지는 단일단 전압 벨런싱 회로에 대해 소개한다.

2. 기존 토폴로지

2.1 DAB 컨버터

양극성 DC 버스를 구성하기 위해 필요한 컨버터는 DAB와 전압벨런서이다. 기존 AC 계통에서 AC/DC와 DAB를 통해 절연된 DC 버스 전압을 만들고 전압 벨런서를 통해 최종적으로 양극성 DC 버스 전압을 형성한다. 그림 2는 DAB 컨버터의 회로도이다²⁾. DAB 컨버터는 고주파 변압기와 두 개의 브릿지 구조로 이루어져 있다. 고주파 변압기를 통한 절연이 가능하다. 또한 대칭적인 브릿지 구조로 인해 양방향 전력변환이 가능하여 AC 계통에서 DC 버스로 전력을 자유롭게 투입하고 추출할 수도 있다. 다른 컨버터에 비해 두 브릿지에서 모두 영전압 스위칭이 가능하여 높은 전력변환 효율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 DAB 컨버터는 그림 2에서 볼 수 있듯이 단극성 출력전압만을 형성하기에 양극성 DC 버스 전압을 만들지 못한다. 또한 별도의 회로 없이는 양극성 DC 버스에서 나타나는 불균형한 전력 흐름에 대해 대처하지 못하기 때문에 양극성 전압을 제어할 수 없다. 따라서 전압 벨런서가 별도의 회로로 연결되는 2단 구조로 필요하다.

2.2 전압 벨런서

그림 3은 양극성 DC 전압을 벨런싱하기 위한 전압 벨런서의 회로도이다. 그림 3(a)는 Full-bridge로 이루어진 구조로

낮은 전압에 적합하고³⁾, 그림 3(b)는 Three-level로 이루어진 회로로 보다 높은 전압에 사용된다⁴⁾. 전압 벨런서는 인덕터를 이용하여 전류를 재분배하여 불균형한 전력 흐름을 보상하여 전압을 벨런싱할 수 있다.

3. 단일단 전압 벨런서

3.1 2-레벨 단일단 전압 벨런서

기존 토폴로지의 단점인 2단 구성을 해결하기 위해 단일단 전압 벨런서를 소개한다. 그림 4는 저전압에 적합한 Two-level 단일단 전압 벨런싱 회로이다⁵⁾. 기존 DAB의 구조를 기반으로 양방향 전력전달 및 절연이 가능하다. 기존 DAB에서 변경된 부분은 양극성 전압을 위해 출력단을 두 직렬 캐패시터로 분리하고 두 인덕터가 중성점에 연결된다.

그림 5는 Two-level 단일단 전압 벨런서의 주요 스위칭 및 동작 파형이다. 기존 DAB와 동일하게 변압기의 일차측 전압과 이차측 전압의 위상차이로 전력을 조절한다. 출력전력 수식은 아래의 (1)과 같다.

$$P_o = \frac{n V_{IN} V_{out}}{2\pi f_s L_s} (\phi - \frac{\phi^2}{\pi}) \quad (1)$$

양극성 전압 제어를 위해 출력단 인덕터에 DC offset 전류

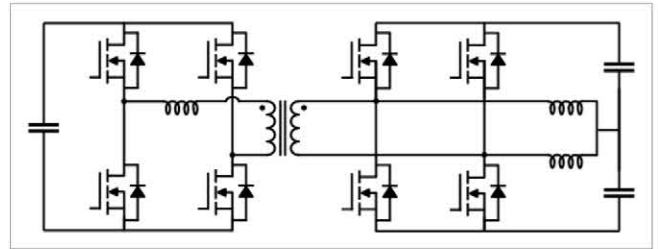


그림 4 Two-level 단일단 전압 벨런싱 회로

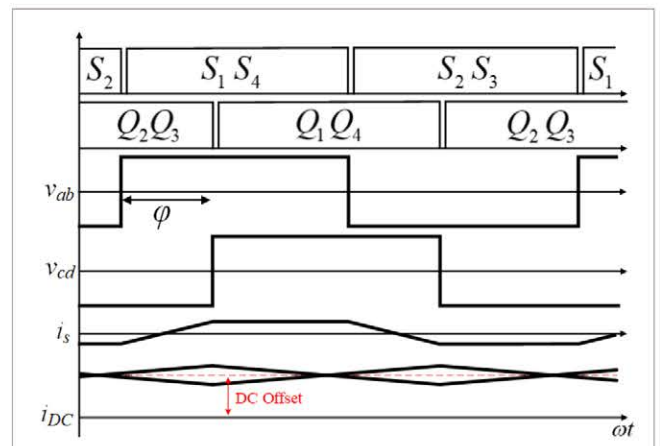


그림 5 스위칭 및 동작 파형

를 형성한다. DC offset 전류를 통해 출력단 전력을 재분배하여 불균형한 전력 흐름을 보상하게 된다. 양극성 부하가 균형을 이루게 되면 DC offset 전류값은 0이 되어 전력을 보상하지 않는다. 하지만, 예를 들어 두 양극성 부하의 아래쪽이 더 많은 전력을 요구하게 되면 DC offset 전류값은 양이 되어 부족한 전력을 보충하게 된다. 마찬가지로 위 부하가 더 많은 전력을 요구하게 되면 DC offset 전류는 음의 값으로 불균형한 전력을 보충한다. 이를 수식적으로 표현하고자 인덕터에 평균자속균등(Volt-second Balance) 법칙을 적용하면 다음과 같이 나타난다.

$$\int_0^T v_L(t)dt = V_{out1}DT - V_{out2}(1-D)T = 0 \quad (2)$$

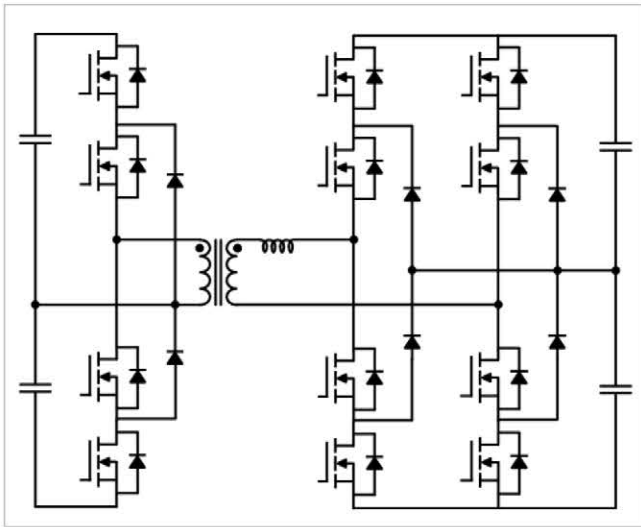


그림 6 Three-level 단일단 전압 밸런싱 회로

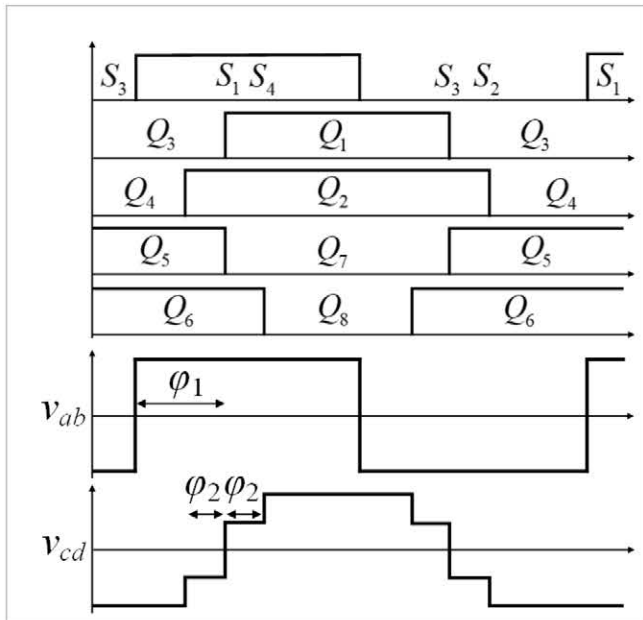


그림 7 스위칭 및 동작 파형

여기서 D 는 스위치 듀티사이클이고, V_{out1} 과 V_{out2} 는 양극성 전압 레벨을 나타낸다. 이를 V_{out1} 과 V_{out2} 에 대해 정리하면 아래의 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\frac{V_{out2}}{V_{out1}} = \frac{D}{1-D} \quad (3)$$

결론적으로 DAB 컨버터에 적용되는 D 는 0.5이기 때문에 양극성 출력단 V_{out1} 과 V_{out2} 는 같은 값으로 밸런싱 되는 것을 수식적으로 알 수 있다.

3.2 3-레벨 단일단 전압 밸런싱

그림 6은 고전압에 적합한 Three-level로 이루어진 단일단 전압 밸런서이다⁶⁾. 일차측은 Half-bridge, 이차측은 Full-bridge로 구성된다. Three-level 구조는 스위치를 직렬로 연결하여 스위치에 걸리는 전압을 반으로 줄여 정격전압이 낮은 소자로 높은 DC-link 전압을 구현할 수 있다. 출력단은 중성점과 함께 양극성 출력을 만들 수 있기 때문에 양극성 전압을 구성하는데 적합한 구조이다. 기존 Three-level DAB와 동일한 구조를 가지지만, 새로운 스위칭 기법을 적용하여 불균형한 전력 흐름을 보상하는 전압 밸런싱이 가능하다.

그림 7은 밸런싱을 위한 스위칭 및 동작 파형을 보여준다. ϕ_1 은 변압기 전압 일차와 이차 간 위상 차이로 양방향 전력 전달을 조절한다. ϕ_2 는 변압기 이차 측에 전압 레벨을 형성하여 불균형한 전력 흐름을 조절한다. ϕ_2 는 두 출력 간 전력의 차이를 발생시킨다. 즉, ϕ_2 를 조절하면 두 양극성 출력전력을 따로 제어하여 양극성 전압이 불균형한 전력 조건에서 밸런싱이 가능하다. 위 스위칭을 적용한 두 양극성 출력 수식은 아래의 식 (4), (5)와 같다.

$$P_{out1} = \frac{nV_{IN}V_{out1}}{\omega L_s} \left(\frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_1^2}{2\pi} \right) \quad (4)$$

$$P_{out2} = \frac{nV_{IN}V_{out1}}{\omega L_s} \left(\frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_1\phi_2}{\pi} \right) \quad (5)$$

따라서 출력 P_{out2} 이 P_{out1} 보다 ϕ_2 에 의해 낮은 전력값을 가지게 된다. 그림 7과는 대칭적인 스위칭 기법을 적용하면⁶⁾, 출력 P_{out1} 이 P_{out2} 보다 아래의 수식 (6), (7)과 같이 ϕ_2 에 의해 낮아지게 된다.

$$P_{out1} = \frac{nV_{IN}V_{out1}}{\omega L_s} \left(\frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_1\phi_2}{\pi} \right) \quad (6)$$

$$P_{out2} = \frac{nV_{IN}V_{out1}}{\omega L_s} \left(\frac{\phi_1}{2} - \frac{\phi_1^2}{2\pi} \right) \quad (7)$$

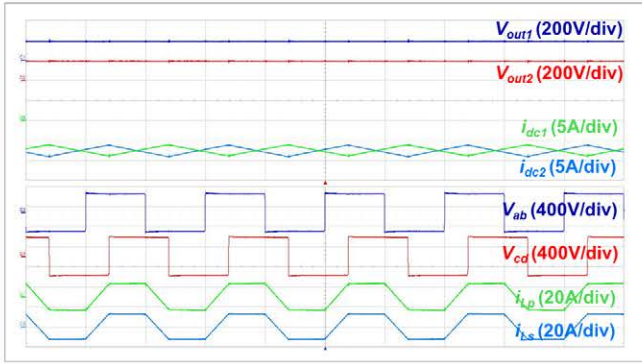


그림 8 Two-level 단일단 벨런서의 실험결과

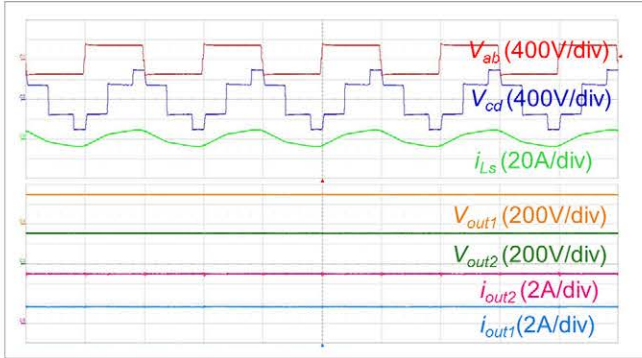


그림 9 Three-level 단일단 벨런서의 실험결과

결론적으로 모든 불균형한 전력 조건을 만족시킬 수 있기 때문에 양극성 전압을 벨런싱할 수 있다.

4. 실험결과

Two-level과 Three-level 단일단 전압 벨런서는 저전압과 고전압 어플리케이션에 맞게 양극성 전압 380V와 600V를 제어하도록 설계되었다. 그림 8은 Two-level 단일단 전압 벨런서의 실험파형을 보여준다. P_{out1} 이 2.9kW이고 P_{out2} 이 0W인 불균형한 부하조건이다. DC Offset 전류는 전류값은 -7.6A로 2.9kW의 불균형한 전력을 보상하여 양극성 전압을 190V로 제어함을 볼 수 있다. 그림 9는 Three-level 단일단 전압 벨런서의 실험파형을 보여준다. P_{out1} 이 1.5kW이고 P_{out2} 이 500W인 부하조건이다. ϕ_1 은 72도로 총 2kW를 공급가능하게 한다. ϕ_2 는 75도로 1kW의 불균형한 전력을 보상하여 양극성 전압을 300V로 제어함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 원고에서는 양극성 직류 배전 시스템에 적용 가능한 단일단 전압 벨런싱 회로에 대해 소개하였다. 기존 토폴로지에 비해 전력변환단계를 단 하나의 단계로 줄여서 전력밀도와 효율을 함께 높일 수 있는 장점이 있다. 저전압과 고전압에 각각 대응 가능한 두 가지의 단일단 전압 벨런싱 회로와 이에 관한 동작원리에 대해 설명하였다. 실험결과 두 단일단 전압 벨런서 모두 양극성 전압 제어를 할 수 있음을 보였다. 결론적으로 소개된 단일단 컨버터를 양극성 직류 배전 시스템에 적용한다면 시스템의 전력밀도 및 전력변환효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 경제성 확보에도 기여할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] D. Kumar, F. Zare, and A. Ghosh, "DC microgrid technology: System architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects," in IEEE Access, Vol. 5, pp. 12230-12256, 2017.
- [2] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, and Y. Sun, "Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 8, pp. 4091-4106, Aug. 2014.
- [3] F. Wang, Z. Lei, X. Xu, and X. Shu, "Topology deduction and analysis of voltage balancers for DC microgrid," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, No. 2, pp. 672-680, Jun. 2017.
- [4] X. Zhang, C. Gong, and Z. Yao, "Three-level DC converter for balancing DC 800-V voltage," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 7, pp. 3499-3507, Jul. 2015.
- [5] J. Lee, H. Kim, and J. Jung, "Enhanced dual-active-bridge DC-DC converter for balancing bipolar voltage level of DC distribution system," in IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [6] J. Lee, Y. Cho, and J. Jung, "Single-stage voltage balancer with high-frequency isolation for bipolar LVDC distribution system," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 5, pp. 3596-3606, May 2020.

이준영 울산과학기술원 전기전자공학과 박사과정

1993년 5월 3일생.

2016년 서강대 전자공학과 졸업.

2016년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 석·박통합과정.



정지훈 울산과학기술원 전기전자공학과 교수

1977년 3월 2일생. 2000년 포항공과대학 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사).

2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2006년~2009년 삼성전자 책임연구원.

2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원.

2013년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 부교수. 당 학회 학술이사.

